

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO: ESTUDO DE CASO PARA UMA EMPRESA DE AMPOLAS DE VIDRO PARA GARRAFAS TÉRMICAS

Flaviana Moreira de Souza Amorim

Universidade Federal Rural do Semi-Árido-UFERSA
59625-900 – Mossoró, RN – Brasil
joflaviana@yahoo.com.br

Daiane Cristina Bortolin

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos (USP-EESC)
13566-590 – São Carlos, SP – Brasil
daiane.bortolin@alumni.usp.br

Márcio da Silva Arantes

Instituto SENAI de Inovação em Sistemas Embarcados
88032-005 – Florianópolis, SC – Brasil
marcio.arantes@sc.senai.br

Magna Paulina de Souza Ferreira

Claudio Fabiano Motta Toledo

Universidade de São Paulo
Instituto de Ciências Matemática e de Computação (USP-ICMC)
13566-590 – São Carlos, SP – Brasil
magnasouza@usp.br
claudio@icmc.usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo matemático desenvolvido em um estudo de caso sobre o planejamento e controle da produção em uma indústria de ampolas de garrafas térmicas. Este é um dos problemas existentes nas indústrias de embalagens de vidro, que possuem fornos onde o vidro é produzido para atender as demandas, sendo posteriormente distribuído a um conjunto de máquinas de moldagem paralelas. Neste artigo, propomos um modelo de otimização que minimiza os tempos de *set-up* para a troca entre os diferentes tipos de ampolas, refletindo a realidade da fábrica. Utiliza-se o método exato, por meio da ferramenta CPLEX para alcançar as soluções ótimas. Os estudos são conduzidos a partir de instâncias reais, fornecidas por uma indústria localizada no Brasil. Portanto, os resultados colaboram com o estado da arte nessa área de pesquisa e com o processo de fabricação industrial de vidro.

PALAVRAS CHAVE. Modelagem matemática, Planejamento e controle da produção, Problemas nas indústrias de embalagens de vidro.

Tópicos (IND - PO na Indústria, PM - Programação Matemática, OC - Otimização Combinatória)

ABSTRACT

This work presents a mathematical model based on a case study, for planning and production control in a thermos ampoule industry. This is a problem in the glass container industry, that has an of furnaces where the glass is produced to meet the demand, being afterward distributed to a set of parallel molding machines. In this paper, we proposed an optimization model that minimizes set-up times for switching between different ampoule types, reflecting the reality of the factory. The exact method is used, with the CPLEX tool to achieve optimal solutions. The studies are conducted from real instances provided by an industry located in Brazil. Therefore, the results collaborate with state of the art in this research area and with the industrial glass manufacturing process.

KEYWORDS. Mathematical modeling, Planning and production control, Glass container industry problems.

Paper topics (IND - OR in the industry, PM - Mathematical Programming, OC - Combinatorial Optimization)

1. Introdução

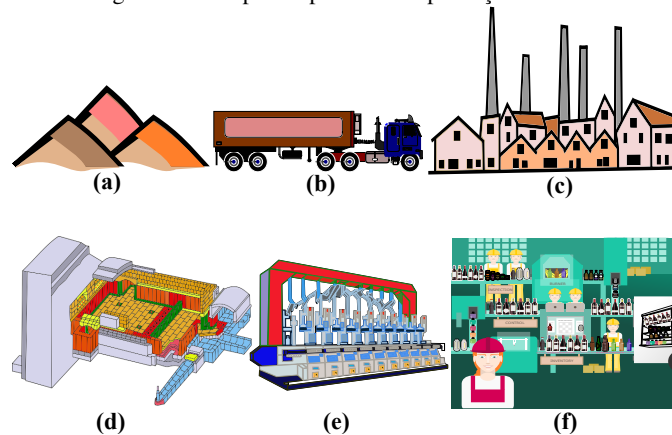
Na sociedade atual, as embalagens são essenciais em qualquer cadeia de produção, pois são responsáveis por proteger e conservar os produtos (alimentos, remédios, bebidas, entre outros). As embalagens podem ser confeccionadas de diversos materiais como metal (alumínio, aço), plástico, vidro e celulose (papel, papelão, *tetra-pak*). As embalagens de vidro se destacam por serem capazes de manter inalterados o sabor, o odor, a cor e a qualidade dos produtos, visto que o vidro é um material inerte, ou seja, não reage quimicamente com os produtos. Além disso, essas embalagens são versáteis (diversas formas, cores e tamanhos), práticas (podem ser levadas à mesa ou ao micro-ondas sem a necessidade de transferir o produto para outro recipiente e podem ser fechadas novamente, quando o produto não é consumido em sua totalidade), resistentes (suportam alterações térmicas) e atóxicas [Landim et al., 2016; Ciclo Vivo, 2019].

As Indústrias de Embalagens de Vidro (IEV) contribuem ambiental, social e economicamente, pois são *eco-friendly*. Logo, as IEV são aliadas do meio ambiente ao causar menos danos à natureza já que o vidro é 100% reciclável e ainda pode ser reciclado várias vezes. A federação europeia classifica 76% das suas embalagens de vidro como ecológicas. Além disso, as IEV europeias contribuem com 9,5 bilhões de euros [Friends of Glass, 2019] no mercado, enquanto as IEV americanas aportam 5,5 bilhões de dólares [Glass Packaging Institute - GPI, 2019]. No Brasil, o valor bruto da produção física de embalagens, em geral, atingiu 57,2 bilhões de reais em 2015 e as embalagens de vidro correspondem a 4,84% deste valor [Associação Brasileira de Embalagem - ABRE, 2019].

O processo de fabricação industrial de embalagens de vidro, desde o recebimento das matérias-primas até o armazenamento do produto final, consiste basicamente das três fases ilustradas na Figura 1. A *primeira fase* (Figuras 1(a) - 1(c)) compreende o transporte, até a fábrica, das matérias-primas que constituem o vidro, como a areia, a sílica (dióxido de silício- SiO_2 , oriundo, na maioria das vezes, do quartzo), a barrilha ou soda (carbonato de sódio- Na_2CO_3), o calcário (carbonato de cálcio- $CaCO_3$) e os cacos recicláveis. Na *segunda fase*, esses materiais são aquecidos em um forno (Figura 1(d)), a uma temperatura que pode chegar a $1600^\circ C$ [Landim et al., 2016], para que sejam misturados, formando um material homogêneo. Na *terceira fase*, esse material seguirá para uma máquina (Figura 1(e)) conectada ao forno para a moldagem do produto final que percorrerá o chão de fábrica até o estoque (Figura 1(f)). Segundo [Azinheira, 2014], o vidro

é um material cerâmico que se define como todos os materiais inorgânicos não metálicos obtidos, geralmente, após o tratamento térmico a temperaturas elevadas.

Figura 1: Exemplo do processo da produção do vidro.



O planejamento da produção é utilizado na prática das indústrias pela comissão do Planejamento e Controle da Produção (PCP). Antes de se estabelecer o processo produtivo, o PCP deve tomar algumas decisões relativas às políticas de produção, estocagem e distribuição das embalagens ao longo do horizonte de planejamento. Esse horizonte pode ser composto por períodos de semanas, trimestres ou anos.

As demandas de ampolas de vidros, preliminarmente conhecidas, implicam no processo de decisão sobre os tipos e as quantidades que são produzidas em cada período, com base na capacidade de derretimento do forno e extração das máquinas. As características mencionadas são de problemas de dimensionamento de lotes para o planejamento da produção. Quando estes são resolvidos conjuntamente, há uma tendência em se antecipar a produção de lotes de embalagens de períodos futuros, buscando reduzir o número de vezes (tempo) que a máquina é preparada para produzir outro tipo de produto (em inglês, *set-up times*) ao longo do horizonte de planejamento. Na prática, antecipar a produção e estocar o produto pode ser uma estratégia mais interessante do que atrasar a produção e correr o risco de suspender o atendimento da demanda, uma vez que os atrasos nas entregas dos produtos impactam no nível de serviço da fábrica.

Nesse contexto, define-se a possibilidade de um tratamento do problema clássico de dimensionamento de lotes considerando um estudo de caso real em uma IEV, onde o processo de fabricação de ampolas de vidro para garrafas térmicas é conduzido. A principal motivação é permitir que as decisões relativas ao processo produtivo sejam determinadas eficientemente, considerando as especificidades existentes na fabricação de ampolas para garrafa térmicas.

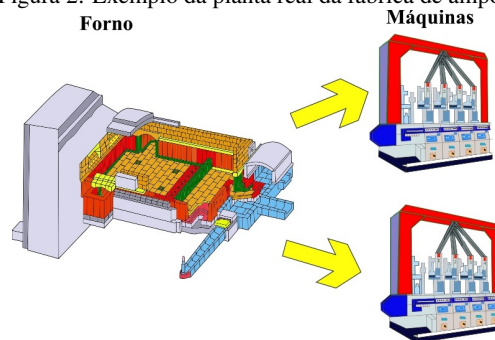
Plantas industriais com fornos únicos ou múltiplos foram simultaneamente considerados em [Toledo et al., 2016], onde o tamanho do lote de produtos transferidos entre plantas é obtido juntamente com as decisões de programação para cada forno. Um modelo de programação linear inteiro misto foi formulado, bem como heurísticas e meta-heurísticas foram propostas. Em [Fachini et al., 2017] foram considerados os tempos de aquecimento e as variações de extração do forno. As configurações podem levar a custos e tempos de aquecimento dependentes da sequência, bem como variações de extração do forno. Enquanto que [Hervet-Escobar e López-Pérez, 2020] aborda um estudo de caso, em que os tempos de configuração envolvidos na mudança de cor faz os fabricantes adotarem seu próprio mix de fornos e máquinas para atender a demanda.

2. Problema na Indústria de Ampolas de Vidros

O modelo matemático proposto para o estudo de caso (EC) descreve o planejamento e o controle da produção de ampolas térmicas de um cenário real, baseado em dados fornecidos por uma fábrica especializada nesse setor. Este modelo é uma extensão do trabalho apresentado em [Amorim et al., 2018].

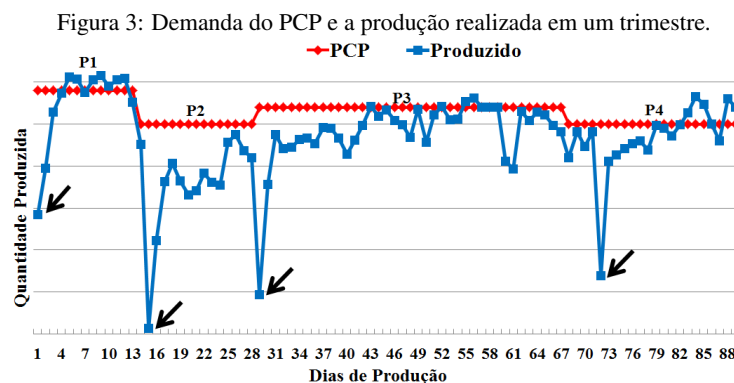
Na empresa analisada são fabricadas cinco tipos de ampolas que variam de acordo com: (i) peso, (ii) custo, (iii) estoque de segurança, (iv) refugo (desperdício diário), (v) número de peças extraídas por máquina, (vi) estoque no início do período e (vii) demanda empurrada do produto, ou seja, em que há uma incerteza. Quando ocorre uma troca entre ampolas, é necessário executar os tempos de *set-up*, ou seja, a preparação da máquina para o próximo produto.

Figura 2: Exemplo da planta real da fábrica de ampolas.



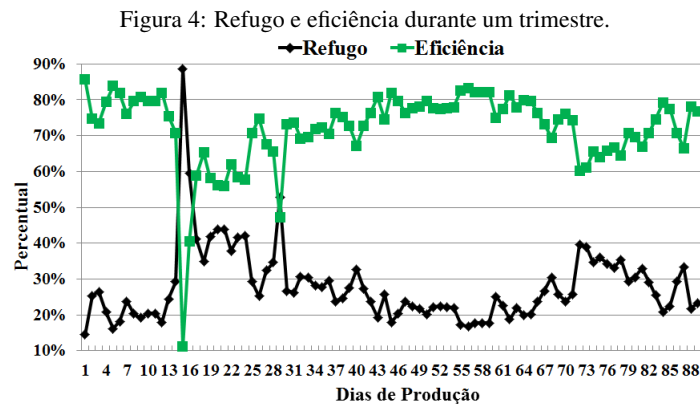
Os aspectos relacionados a planta real para ampolas e suas configurações são ilustrados na Figura 2. Existe um único forno regenerativo de porta traseira com capacidade de derretimento limitado, o qual alimenta duas máquinas que possuem a mesma configuração de quatro seções e boca dupla (em inglês, *Double-Gob* (DG)). Estas, por sua vez, trabalham em conjunto, uma produz a parte interna enquanto a outra é responsável pela produção da parte externa das ampolas.

A demanda prevista pela empresa foi determinada pelo PCP e comparada com a produção alcançada por quatro tipos de ampolas (P1, P2, P3 e P4) durante um trimestre, o resultado é apresentado na Figura 3¹. Observa-se que ocorrem quedas na produção em alguns dias, indicados por uma seta, tal fato acontece devido os tempos *set-up*, ou seja, a preparação da máquina para produzir outro tipo de ampola.

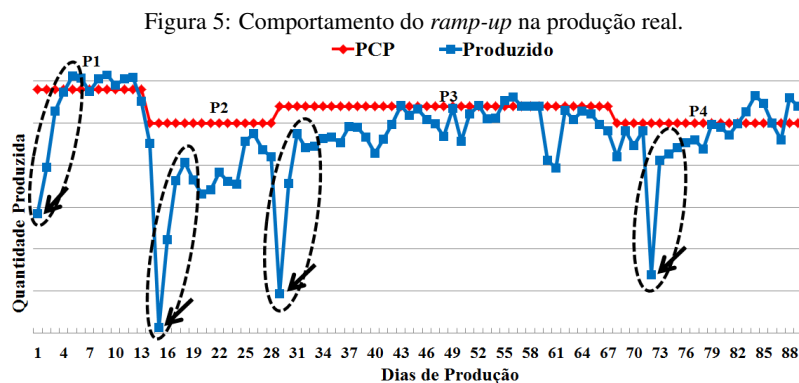


¹Devido a um contrato de confidencialidade, os valores do eixo das ordenadas (y) será omitido em todos os gráficos apresentados.

O refugo é a taxa de desperdício do produto e a eficiência é a taxa de produtos (sem defeitos) que foram aprovados no controle, as duas taxas são calculadas por dia. Considerando os mesmos produtos e período de tempo adotados na Figura 3, apresenta-se o refugo e a eficiência da produção na Figura 4. Observe que acontece uma variação maior do refugo em dias consecutivos, após a ocorrência de troca dos produtos, sendo que a eficiência é complementar ao refugo.

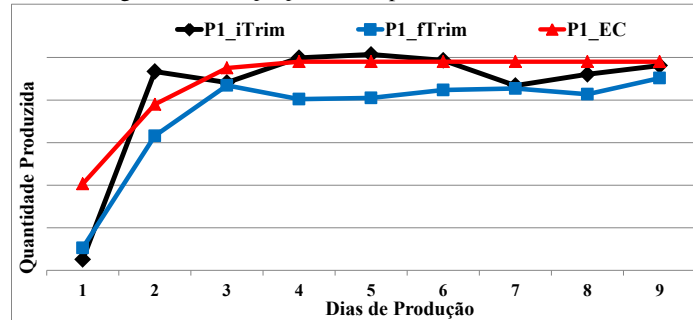


Nesse cenário, a Figura 5 representa o *ramp-up*, que é uma influência maior do refugo agindo sobre a produção após os tempos de *set-up*, conforme destacados pelas elipses tracejadas. No período de *ramp-up*, há uma queda na produção durante alguns dias. Isso acontece devido os tempos *set-up* entre produtos e período de *ramp-up*. A produção se estabilizará após aproximadamente 72 horas.



Uma comparação entre a produção fornecida pelo modelo EC e a produção de um tipo de ampola no início de um trimestre (P1_iTrim - preto) e no final desse trimestre (P1_fTrim - azul) é apresentada na Figura 6. Observe que as taxas médias utilizadas no *ramp-up* do modelo EC são representativas em relação aos dados fornecidos pela fábrica, visto que a variação na produção da ampola é baixa.

Figura 6: O *ramp-up* real comparado com o modelado.



2.1. Formulação Matemática

A produção líquida no modelo EC considera as informações procedentes da fábrica, em que é calculada a ação do refugo e do *ramp-up*, baseando-se em médias anuais do processo de produção. Em um ambiente fabril, alguns aspectos devem ser levados em consideração como: as oscilações do refugo diariamente e as alterações do *ramp-up* após cada um dos tempos de *set-up*, mesmo que seja para um produto já produzido antes. A notação adotada na formulação matemática do modelo EC é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Notação matemática do modelo do EC.

Dados de Entrada:	
Índices de Conjuntos:	
i	Produtos (ampolas) a serem fabricados(as) ($i = 1, \dots, I$).
s	Dias de <i>ramp-up</i> ($s = 1, \dots, S$).
t	Horizonte de tempo ($t = 1, \dots, T$).
Parâmetros:	
C_i	Custo real do produto i .
D_{it}	Demanda do produto i no período t .
ES_i	Estoque de segurança do produto i .
I_{i0}	Estoque inicial do produto i .
L_{is}	Taxa de <i>ramp-up</i> do produto i no dia s .
B	Valor positivo suficientemente grande (<i>Big M</i>).
Q_i	Quantidade de extração da ampola i .
Re_{it}	Refugo do produto i no período t .
Variáveis de Decisão:	
U	Número de vezes que o estoque de segurança foi ultrapassado.
I_{it}	Estoque do produto i no período t .
PL_{it}	Produção líquida do produto i no período t .
PT_{it}	Produção total do produto i no período t .
S_{it}	Variável binária que vale 1 se iniciou a produção do produto i no período t , 0 caso contrário.
V_{its}	Variável auxiliar para linearização.
W_{its}	Variável binária que vale 1 se houver <i>set-up times</i> do produto p no período t no dia s , 0 caso contrário.
X_{it}	Variável binária que vale 1 se existe produção do produto i no período t , 0 caso contrário.

O modelo matemático do EC tem por objetivo determinar um planejamento real para um cenário com menos tempos de *set-up*, com *ramp-up* a um custo mínimo e considerando somente uma máquina. Assim, busca-se determinar um planejamento competitivo com o adotado pelo PCP, de modo a atender a demanda e a satisfazer as restrições do processo produtivo, o balanço de estoque e o estoque de segurança.

A função objetivo (1) minimiza os custos de tempos de *set-up*, *ramp-up* e equilibra o estoque de segurança para evitar a produção exagerada de um mesmo produto com a taxa 0.01, após o atendimento da demanda.

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S W_{its} \cdot Q_i \cdot (1 - L_{is}) \cdot C_i + 0.01 \cdot U \cdot \sum_i ES_i \cdot C_i. \quad (1)$$

As restrições (2) e (3) representam as equações de balanceamento de estoque.

$$I_{it} = PL_{it} - D_{it} + I_{i(t-1)}, \quad \forall(i, t > 1). \quad (2)$$

$$I_{it} = PL_{it} - D_{it} + I_{i0}, \quad \forall(i, t = 1). \quad (3)$$

As restrições (4) equilibram o estoque de segurança, penalizando na função objetivo o maior número de vezes E que esse estoque foi ultrapassado.

$$\frac{I_{it}}{ES_i} \leq U, \quad \forall(i, t). \quad (4)$$

As restrições (5) - (8) representam a linearização para $V_{its} = W_{its} \cdot PT_{it}$.

$$V_{its} \geq PT_{it} - B \cdot (1 - W_{its}). \quad (5)$$

$$V_{its} \leq PT_{it} + B \cdot (1 - W_{its}). \quad (6)$$

$$W_{its} \cdot B \geq V_{its}. \quad (7)$$

$$-W_{its} \cdot B \leq V_{its}. \quad (8)$$

As restrições (9) obtêm a produção líquida de ampolas da seguinte forma: se houver tempos de *set-up* do produto, então a influência do *ramp-up* ocorre durante aproximadamente três dias, ou seja, $PL_{it} = \sum_{s=1}^S V_{its} \cdot L_{is}$ onde L_{is} é uma porcentagem de PT_{it} . Caso não haja tempos de *set-up* do produto, então $PL_{it} = (PT_{it} - \sum_{s=1}^S V_{its}) \cdot (1 - Re_i)$ e, assim, temos apenas a influência do refugo na produção das ampolas.

$$PL_{it} = \sum_{s=1}^S V_{its} \cdot L_{is} + (PT_{it} - \sum_{s=1}^S V_{its}) \cdot (1 - Re_i), \quad \forall(i, t). \quad (9)$$

As restrições (10) afirmam que a produção total deve ser igual a quantidade de extração da ampola i em um dia normal t , somente se o produto estiver ativado.

$$PT_{it} = Q_i \cdot X_{it}, \quad \forall(i, t). \quad (10)$$

As restrições (11) permitem que se tenha apenas um produto ativado na máquina por vez.

$$\sum_{i=1}^I X_{it} = 1, \quad \forall(t). \quad (11)$$

As restrições (12) e (13) representam os tempos de *set-up*, onde a diferença entre o produto ativo no período atual e no período anterior determinam se ocorre ou não os tempos de *set-up*.

$$S_{it} \geq X_{it} - X_{i(t-1)}, \quad \forall(i, t > 1). \quad (12)$$

$$S_{it} = X_{it}, \quad \forall(i, t = 1). \quad (13)$$

As restrições (14) determinam os estágios do *ramp-up* após a ocorrência de tempos de *set-up* do produto.

$$S_{it} = W_{i(t+s)s}, \quad \forall (i, s, t < T - s). \quad (14)$$

As restrições (15) e (16) representam os domínios das variáveis.

$$I_{it}, PL_{it}, PT_{it}, V_{its}, U \geq 0, \quad (15)$$

$$X_{it}, S_{it}, W_{its} \in \{0, 1\}. \quad (16)$$

3. Experimentos Computacionais

O método adotado nesta pesquisa está relacionada ao estudo do modelo matemático proposto, implementando inicialmente na ferramenta de otimização *IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio*, que suporta a linguagem de programação de otimização (OPL, do inglês, *Optimization Programming Language*). Essa ferramenta usa a tecnologia de otimização de decisão para desenvolver e implementar modelos de otimização que podem melhorar significativamente os resultados de problemas de planejamento com a linguagem OPL [International Business Machines Corporation - IBM, 2019].

Após os modelos serem testados pelo CPLEX, eles foram implementados na ferramenta *Professional Optimization Framework* (ProOF) [Arantes, 2013], proposta em [Arantes, 2014].

O desempenho do CPLEX é avaliado com base na diferença (em inglês, *GAP*) entre o Limite Superior (LS) e o Limite Inferior (LI) obtido pelo *solver* CPLEX. A Equação (17) define essa diferença.

$$GAP_{exato}(\%) = 100 \times \frac{LS_{CPLEX} - LI_{CPLEX}}{LS_{CPLEX}} \quad (17)$$

Os experimentos computacionais foram realizados em um computador com Intel Xeon E5-2680v2 com frequência de 2,8 GHz, 128 GB de RAM e sistema operacional Linux.

3.1. Geração de instâncias

Para avaliar e validar o modelo proposto, de acordo com as características específicas para o EC, foram elaborados grupos de instâncias fidedignos aos dados reais, disponibilizados pela fábrica. Assim, as demandas não serão apresentadas na íntegra devido a um contrato de confidencialidade. As instâncias elaboradas possuem a seguinte estrutura de entrada:

- $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$;
- $t = 90$ ou 365 ;
- $s = 3$ (número de dias de *ramp-up*);
- $C_i \in \{\text{R\$ } 1.00 - \text{R\$ } 2.50\}$;
- $D_{it} \in \{\text{Valor A e Valor B}\}$;
- $ES_i \in \{600 - 120 \text{ mil}\}$;
- $I_{i0} \in \{9 \text{ mil} - 600 \text{ mil}\}$;
- $L_{is} \in \{30\% - 75\%\}$;
- $B = 1000000$ (*Big M*);
- $P_i \in \{0.150\text{g} - 0.600\text{g}\}$;
- $Q_{im} \in \{15 \text{ mil} - 31 \text{ mil}\}$;
- $Re_{it} \in \{19\% - 33\%\}$.

Considera-se o planejamento para a instalação de uma única máquina, aplicando o modelo EC para os anos de 2018 e 2019. Para o ano de 2018, as instâncias foram elaboradas a partir dos dados reais, combinados em trimestres, com a finalidade de ponderar o período anual. Dessa forma, obteve-se os seguintes grupos de instâncias: Janeiro+Fevereiro+Março (JFM), Fevereiro+Março+Abril (FMA) até o trimestre Outubro+Novembro+Dezembro (OND), como apresentados na Tabela 2.

Além disso, foram elaboradas 10 instâncias considerando a demanda planejada pelo PCP (Valor A) e outras 10 instâncias conforme a produção alcançada pela fábrica (Valor B).

Tabela 2: Grupos de Instâncias para 2018.

Trimestres	Demandas	
1-JFM	PCP	Produzido
2-FMA		
3-MAM		
4-AMJ		
5-MJJ		
6-JJA		
7-JAS		
8-ASO		
9-SON		
10-OND		

As instâncias para o planejamento de 2019 foram elaboradas a partir dos dados reais de 2018, considerados em dias. Além disso, o planejamento previsto pelo PCP, para o ano de 2019, foi disponibilizado como dado de entrada para teste no modelo. Assim, foi alcançada pelo CPLEX uma sequência nova para o planejamento. O modelo elaborado descreve de forma fidedigna as últimas informações fornecidas pela fábrica. Nos experimentos computacionais, um total de 21 instâncias foram resolvidas na otimalidade pelo modelo, 20 para os dados de 2018 e uma para 2019. Na próxima seção, são apresentados os resultados por grupos de instâncias.

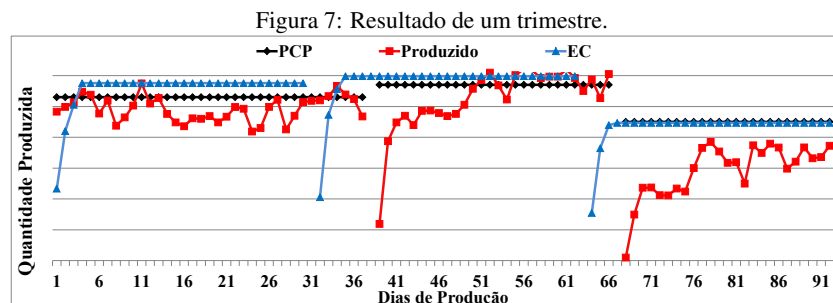
3.2. Resultados

Os tempos de *set-up* em cada trimestre de 2018 é apresentada na Tabela 3. As ocorrências dos tempos de *set-up* na coluna *Real* mostra a quantidade de preparações feitas nas trocas entre as ampolas. A partir dos dados reais do PCP (previsão de demandas), foram obtidas as quantidades apresentadas na coluna *EC-PCP* pelo modelo. Na coluna *EC-Prod* são retratados os resultados obtidos pelo modelo a partir dos dados da produção executados pela fábrica (demandas de fato produzidas). Destacam-se os trimestres 1-JFM, 2-FMA, 4-AMJ, 8-ASO, 9-SON e 10-OND, em que o número de tempos de *set-up* obtidos pelo modelo, com as instâncias geradas a partir dos dados do PCP e da produção, foram iguais ou menores aos números de tempos de *set-up* reais da fábrica.

Tabela 3: Tempos de *set-up* por trimestre.

Tempos de Set-up's			
Trimestres	Real	EC-PCP	EC-Prod
1-JFM	4	3	3
2-FMA	4	4	3
3-MAM	3	3	3
4-AMJ	4	3	3
5-MJJ	3	3	3
6-JJA	3	3	3
7-JAS	3	3	3
8-ASO	4	3	3
9-SON	4	2	2
10-OND	4	3	2

Apresentando a produção líquida alcançada pelo modelo EC no trimestre 7-JAS, a Figura 7 indica o resultado para três tipos ampolas que foram planejadas pelo PCP e produzidas. O modelo decide produzir por 30 dias cada ampola e garante o atendimento da demanda, porém a fábrica opta por produzir durante mais dias a primeira e segunda ampola, reduzindo o tempo para terceira.



O comportamento do *ramp-up*, apresentado na Figura 7, é coerente com a produção inicial nas duas últimas ampolas. Note que existe uma queda de produção quando há troca entre os tipos de ampolas produzidas, sendo que após três dias se estabiliza.

O planejamento do PCP para o ano de 2019, a partir dos dados dos 365 dias do ano de 2018, está representado na Figura 8, pelos retângulos azuis, em que existem nove tempos de *set-up* durante esse ano. Observa-se que o quinto produto (P5) é produzido em três meses não sequenciais, nos meses de maio, setembro e dezembro.

Figura 8: Sequência do planejamento do PCP.

Produtos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P1												
P2												
P3												
P4												
P5												

A sequência do planejamento alcançado pelo método CPLEX, considerando o planejamento para o ano de 2019 usados no PCP, está representada na Figura 9, pelos retângulos vermelhos. O número de tempos de *set-up* durante o ano cai para cinco. Nesse caso, destaca-se novamente o quinto produto (P5) que foi produzido em três meses sequenciais: maio, junho e julho.

Figura 9: Sequência do planejamento do CPLEX.

Produtos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P1												
P2												
P3												
P4												
P5												

Uma interseção das sequências do planejamento do PCP com o CPLEX para os dados do ano de 2019 é ilustrada na Figura 10. Os retângulos verdes representam os meses nos quais o planejamento do PCP coincide com o resultado do modelo, sendo que foram adotados os mesmos

dados utilizados pelo PCP. Novamente, destaca-se o quinto produto (P5), cuja produção se inicia no mês de maio tanto no planejamento real do PCP, quanto no resultado do modelo proposto.

Figura 10: Interseção dos planejamentos.

Produtos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P1						Blue	Red					
P2	Blue	Green	Green	Red	Red		Blue	Blue		Red	Green	Red
P3												
P4	Green	Red		Blue				Red	Red	Green		
P5					Green	Red	Red		Blue			Blue

4. Conclusões

O presente trabalho descreve um estudo de caso, considerando problema de dimensionamento de lotes e planejamento da produção, voltado à produção de ampolas de vidro para garrafas térmicas. Um modelo matemático foi proposto cuja resolução exata, aplicando o CPLEX, foi capaz de resolver todas as instâncias de 2018 na otimalidade e com menos tempos de *set-up* em seis trimestres de dez avaliados. Os valores utilizados para calibrar o *ramp-up* se mostram eficientes para duas das três ampolas produzidas no trimestre 7-JAS, porém para a primeira ampola se faz necessário verificar uma melhor maneira de representar as alterações para sua produção. Para os dados de 2019, obteve-se uma nova sequência de planejamento com menos tempos de *set-up* que o planejamento do PCP da fábrica. Portanto, o modelo proposto é uma representação confiável da realidade da fábrica. Dessa forma, obtém-se uma nova possibilidade de criar os planejamentos da produção com base nos resultados alcançados. Como trabalhos futuros, pretende-se desenvolver outras abordagens considerando um modelo com tratamento estocástico, devido às variações produtivas das ampolas. Além disso, outros métodos serão propostos que combinem meta-heurística com técnicas de programação matemática como Algoritmos Genéticos, Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP), Iterated Local Search (ILS) e Simulated Annealing (SA).

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq-grant 483474/2013-4) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Essa pesquisa foi desenvolvida com utilização dos recursos computacionais do Centro de Ciências Matemáticas Aplicadas à Indústria (CeMEAI), financiados pela FAPESP (proc. 2013/07375-0).

Referências

- Amorim, F. M. S., Ferreira, M. P. S., Arantes, M. S., e Toledo, C. F. M. (2018). Estudo do caso do planejamento da produção em indústrias de ampolas térmicas. In *L Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Campinas. Galoá.
- Arantes, M. S. (2013). Professional optimization framework (ProOF), Version 2.4.0. Disponível em: <https://github.com/marcio-da-silva-arantes/ProOF/wiki>. Acessado: 30/11/2018.
- Arantes, M. S. (2014). Ambiente para desenvolvimento de métodos aplicados a problemas de otimização. Dissertação de mestrado, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, S.P.

- Associação Brasileira de Embalagem - ABRE (2019). Dados do setor. Disponível em: <http://www.abre.org.br/setor/estudo-macroeconomico-da-embalagem-abre-fgv/>. Acessado: 02/04/2019.
- Azinhiera, V. P. D. (2014). Controle de qualidade e ambiente ao nível de uma indústria vidreira. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra.
- Ciclo Vivo (2019). Benefícios do uso do vidro como embalagem. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/vida-sustentavel/bem-estar/6-beneficios-do-uso-do-vidro-como-embalagem/>. Acessado: 25/03/2019.
- Fachini, R. F., Esposto, K. F., e Camargo, V. C. B. (2017). Glass container production planning with warm-ups and furnace extraction variation losses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4):527–543.
- Friends of Glass (2019). Facts about glass and circular economy worth knowing. Disponível em: <https://www.friendsofglass.com/ecology/8-facts-about-glass-circular-economy-worth-knowing/>. Acessado: 16/08/2016.
- Glass Packaging Institute - GPI (2019). Recycling and energy policies. Disponível em: <http://www.gpi.org/advocacy/recycling-energy-policies>. Acessado: 02/04/2019.
- Hervet-Escobar, L. e López-Pérez, J. F. (2020). Production planning and scheduling optimization model: a case of study for a glass container company. *Annals of Operations Research*, 286(1): 529–543.
- International Business Machines Corporation - IBM (2019). CPLEX optimization studio fundamentals tutorial. Disponível em: <https://www.ibm.com/cloud/garage/dte/tutorial/cplex-optimization-studio-fundamentals-tutorial>. Acessado: 06/05/2019.
- Landim, A. P. M., Bernardo, C. O., Martins, I. B. A., Francisco, M. R., Santos, M. B., e Melo, N. R. (2016). Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 26.
- Toledo, C. F. M., Arantes, M., Hossomi, M. Y. B., e Almada-Lobo, B. (2016). Mathematical programming-based approaches for multi-facility glass container production planning. *Computers Operations Research*, 74(2016):92–107.